

***Г. А. Белозеров<sup>1\*</sup>, А. С. Смирнов<sup>1</sup>, А. В. Коновалов<sup>1</sup>, В. П. Швейкин<sup>1</sup>,  
А. В. Перминова<sup>2</sup>***

<sup>1</sup>Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,  
г. Екатеринбург.

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург.

*\*george@imach.uran.ru*

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук *В. П. Швейкин*

## **ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ МИКРОСТРУКТУРЫ В МЕТАЛЛОМАТРИЧНОМ КОМПОЗИТЕ В95/ 10 % SiC**

В работе исследуется влияние температурно-скоростных условий деформаций на параметры микроструктуры в металломатричном композите (ММК) с матрицей из сплава В95 армированной SiC с объемным содержанием 10%. Метод дифракции обратноотраженных электронов позволил установить, что в диапазоне температур 400–500 °С и скоростей деформаций 0,1–5,5 с<sup>-1</sup> основным процессом разупрочнения в ММК была *in situ* рекристаллизация.

*Ключевые слова:* алюминиевый сплав, порошковая металлургия, металломатричный композит.

***G. A. Belozеров, A. S. Smirnov, A. V. Konovalov, V. P. Shvejkin,  
A. V. Perminova***

## **THE INFLUENCE OF TEMPERATURE-RATE CONDITIONS OF DEFORMATION ON THE PARAMETERS OF MICROSTRUCTURE IN V95/ 10 % SiC METAL MATRIX COMPOSITE**

The work deals with studying the influence of temperature-rate conditions of deformation on the parameters of microstructure in metal matrix composite (MMC) with the V95 alloy as the matrix and reinforced with 10 vol % SiC. It has been experimentally found that, strain rates ranging between 0.1 and 5.5 s<sup>-1</sup> and temperatures ranging between 400 and 500 °C, the main softening mechanism in the MMC is *in situ* recrystallization.

*Keywords:* aluminum alloy, powder metallurgy, metal matrix composite.

### **Введение**

По сравнению с алюминиевыми сплавами металломатричные композиты (ММК) на основе алюминиевой матрицы обладают более лучшими характеристиками, связанными с прочностью, жесткостью,

теплопроводностью, износостойкостью [1]. В результате все большее применение ММК находят в конструкциях различных летательных аппаратов [2]. Производство конструкционных изделий из ММК, как правило, состоит из двух стадий: получение заготовки и последующая ее обработка методами пластической деформации [3]. Параметры обработки заготовки, разработанные для матрицы ММК, не подходят для металломатричных композитов из-за наличия в них твердых частиц, которые сильно влияют на реологическое поведение, процессы формирования микроструктуры и пластичность композита. В предыдущей работе [4] были представлены результаты исследований влияния режимов деформации на формирование микроструктуры ММК В95/SiC 10 % в диапазоне изменения температур 400–500 °С и скоростей деформаций 0,1–0,25 с<sup>-1</sup>.

Целью настоящей работы является исследование формирования микроструктуры и механизмов разупрочнения ММК В95/SiC 10 % при его деформировании в диапазоне температур 400–500 °С и скоростей деформаций 0,1–5,5 с<sup>-1</sup>.

В работе проводили исследование микроструктуры металломатричного композита с матрицей из алюминиевого сплава В95 (Al–Zn–Mg–Cu сплав) с добавкой частиц SiC с объемным содержанием 10 %. Композит был изготовлен во Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов путем спекания смеси порошка из сплава В95 и упрочняющих частиц SiC без последующего компактирования. Средний диаметр частиц порошка из сплава В95 составлял 40 мкм, а размер частиц SiC был 4 мкм.

Из композита были изготовлены цилиндрические образцы диаметром 6 мм и высотой 9 мм, которые испытывали сжатием на пластометрической установке конструкции Института машиноведения УрО РАН. Величина относительного обжатия образца в эксперименте составляла 50 %. Микроструктуру образцов исследовали до и после деформации. Микроструктура композита до деформации изучалась на образцах после их нагрева в контейнере до температуры испытания, которая была 400 и 500 °С. Время нагрева образцов до температуры испытания составляла 1 час. Исследование микроструктуры проводили методом дифракции отраженных электронов (ДОЭ) на продольном шлифе на его боковой части и в центре.

На рис. 1, а, б приведены три зависимости скорости деформации образцов от времени (законы деформации). На рис. 1, в, г представлены соответствующие законам деформации кривые сопротивления деформации ММК В95/SiC 10 % для температур 400 и 500 °С.

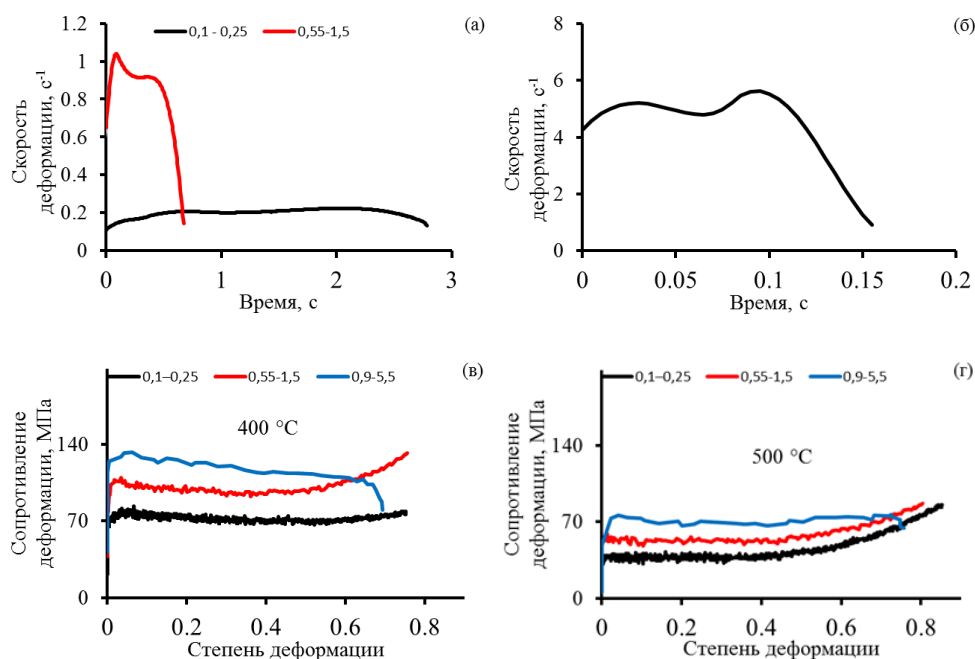


Рис. 1. Зависимость скорости деформации образцов от времени – а, б и сопротивления деформации от степени деформации – в, г для закона деформации образца, приведенного на рис. 1, а, б

Из рис. 1 видно, что при температуре 400 °С композит в начале деформации претерпевает упрочнение, затем происходит разупрочнение, которое сменяется упрочнением. При температуре 500 °С в диапазоне скоростей деформаций 0,1–0,25 с⁻¹ после упрочнения на начальной стадии деформации следует установившийся участок вплоть до степени деформации, равной 0,32.

На рис. 2–5 представлены зависимости среднего диаметра зерен  $D$  (рис. 2 и 4) и доли разориентации малоугловых границ  $S$  (рис. 3 и 5) от температуры образцов, полученных в результате нагрева без деформации до температуры 400 и 500 °С, а также после сжатия для диапазона скоростей деформаций 0,1–5,5 с⁻¹. В данной работе анализировали малоугловые границы с разориентацией, находящейся в диапазоне от 2 до 15°.

Из рис. 2 и 5 видно, что средний диаметр зерен  $D$  уменьшился, а доля малоугловых границ  $S$  выросла после деформации в центре и на боковой поверхности образца. На основании этого можно сделать вывод, что в матрице ММК в процессе деформации шла *in situ* рекристаллизация, которая является основным механизмом разупрочнения для сплавов с высокой энергией дефекта упаковки [5]. Также из рис. 2 и 5 видно, что диаметр зерен  $D$  в центре образца стал меньше, чем на боковой поверхности из-за более высокой накопленной степени деформации образца в центре. Наличие на кривых сопротивления деформации участка упрочнения после стадии разупрочнения можно объяснить двумя

причинами: замедлением проходящей в матрице ММК *in situ* рекристаллизации, а также закреплением субграниц и свободных дислокаций на дисперсоидах [5].

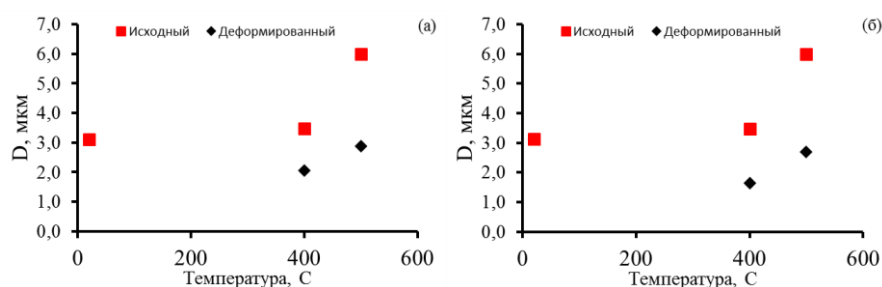


Рис. 2. Зависимость среднего диаметра зерен  $D$  от температуры при скорости сжатия образца  $0,1-0,25 \text{ с}^{-1}$ :  $a$  – на боковой части;  $b$  – в центре

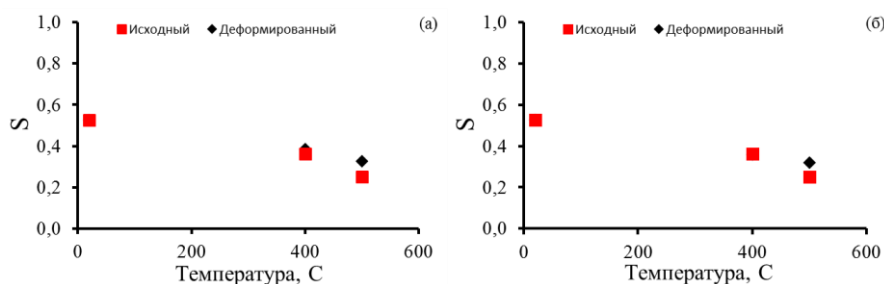


Рис. 3. Зависимость доли разориентации малоугловых границ  $S$  от температуры при скорости сжатия образцов  $0,1-0,25 \text{ с}^{-1}$ :  $a$  – на боковой части;  $b$  – в центре

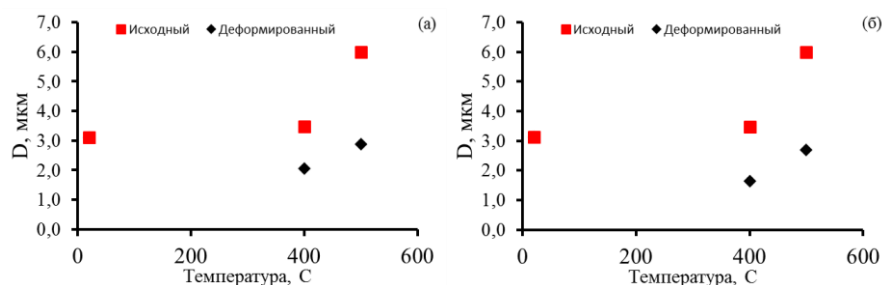


Рис. 4. Зависимость среднего диаметра зерен  $D$  от температуры при скорости сжатия образца  $0,9-5,5 \text{ с}^{-1}$ :  $a$  – на боковой части;  $b$  – в центре

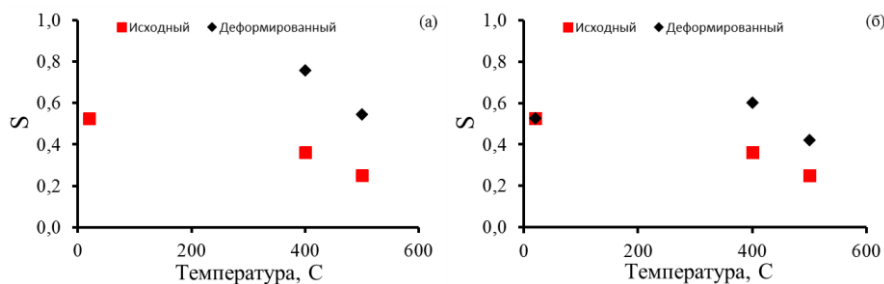


Рис. 5. Зависимость доли разориентации малоугловых границ  $S$  от температуры при скорости сжатия образца  $0,9-5,5 \text{ с}^{-1}$ :  $a$  – на боковой части;  $b$  – в центре

Экспериментально установлено, что при деформации ММК В95/SiC 10 % в диапазоне температур 400–500 °С и скоростей деформаций 0,1-5,5 с<sup>-1</sup> происходит уменьшение среднего диаметра зерна и увеличение доли малоугловых границ по сравнению с состоянием перед деформацией. В результате основным процессом разупрочнения в исследуемом температурно-скоростном диапазоне является *in situ* рекристаллизация.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 14-19-01358.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Pugacheva N. B., Michurov N. S., Bykova T. M. The Structure and Properties of the 30Al-70SiC Metal Matrix Composite Material // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2015. № 6. P. 6–18.
2. Березовский В. В. Применение дисперсно-упрочненных металлических композиционных материалов на основе алюминиевого сплава, армированного частицами SiC в авиационной промышленности // Новости материаловедения. Наука и техника. 2013. № 4. С. 1–11.
3. Коновалов А. В., Смирнов С. В. Современное состояние и основные направления исследований по металломатричным композитам системы Al/SiC // Конструкции из композиционных материалов. 2015. № 1. С. 30–35.
4. Реологическое поведение и формирование микроструктуры композита на основе сплава системы Al-Zn-Mg-Cu с 10% содержанием SiC / А. С. Смирнов [и др.] // X Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций»: сб. материалов. Екатеринбург : ИМАШ УрО РАН, 2016. С. 74.
5. Горелик С. С., Добаткин С. В., Капуткина Л. М. Рекристаллизация металлов и сплавов. 3-е изд. М. : МИССИС 2010. 80 с.
6. Sun Z.-C., Zheng L.-S., Yang H. Softening mechanism and microstructure evolution of as-extruded 7075 aluminum alloy during hot deformation // Materials Characterization. 2014. Vol. 90. P. 71–80.